

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНДЕНСАЦІЇ ВОЛОГИ НА ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРА НА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ МЕТОДУ ТАНЕННЯ ЛЬОДУ

О. Ю. Степанюк<sup>1</sup>, А. А. Халатов<sup>1,2</sup>, Г. В. Коваленко<sup>2</sup>, М. А. Мулярчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Фізико-технічний інститут

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України

## Анотація

Уточнено методику визначення середньої тепловіддачі з застосуванням калориметрів з льодом, що тоне і виконано тарувальні експерименти. Тарувальні експерименти виконано при поперечному обтіканні вологим повітрям однорядного пучка круглих циліндрів діаметром 22 мм. Показано, що неврахування утворення роси може привести до значних помилок при визначенні коефіцієнта тепловіддачі, особливо при вологості повітря більше 53%.

**Ключові слова:** калориметр з льодом, що тоне, похибка визначення коефіцієнту теплообміну, поперечне обтікання циліндрів

## Вступ

Експериментальне визначення коефіцієнта тепловіддачі при зовнішньому обтіканні циліндра є складною задачею. При поперечному обтіканні гладких циліндрів розподіл температури (теплоотдачі) по їх поверхні залежить від характеру потоку (ламінарний чи турбулентний), умов відриву примежового шару і утворення вихрових зон [1]. В даний час відомі і використовуються кілька методів експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі, що мають різну ступінь похибки. Кращі результати одержують при використанні методів калориметрії. В ІТТФ НАН України при дослідженні теплообміну при поперечному обтіканні труб зі складною зовнішньою поверхнею використовуються калориметри з льодом, що тоне [2]. У цьому методі середній коефіцієнт тепловіддачі визначається за масою води, що утворилася в результаті танення льоду, розташованого всередині циліндричного калориметра. Як показують розрахунки відносна похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі при використанні сухого повітря становить 10,5%.

Особливістю методу є постійна температура зовнішньої поверхні циліндра-калориметра, яка близька до 0°C. У цих умовах при високій вологості оточуючого повітря на поверхні циліндра-калориметра можливе випадання крапельної вологи, яка трансформується в тонку плівку. Неврахування випадіння вологи на поверхню циліндра може привести до великих помилок при визначенні коефіцієнта тепловіддачі.

Метою даної роботи є розробка методики визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі методом танення льоду з урахуванням вологи, яка випадає

на поверхні циліндра-калориметра. Дослідження виконується в діапазоні зміни числа Рейнольдса, розрахованого по зовнішньому діаметру труби, від 2000 до 17000.

## 1. Експериментальна установка і методика проведення дослідів

Схема експериментальної установки показана на рис. 1. Вона являє собою газодинамічний контур відкритого типу, який працює за рахунок всмоктування зовнішнього повітря вентилятором 1 (рис. 1)

Повітряний потік надходить у вхідний канал контуру, в якому розташовано вимірювач витрати (чашковий анемометр) 5, проходить через хонейкомб 4, який слугує для забезпечення рівномірного поля швидкостей по перерізу каналу, і поступає до робочої ділянки, в якій встановлено однорядний пучок циліндрів з п'яти трубок з центральною трубкою – калориметром.

Перед вентилятором, існує додатковий патрубок з вентиляем 3 для підсмоктування повітря із атмосфери з метою регулювання витрати основного потоку (в бік його зменшення). Стінки каналу робочої ділянки виготовлено з оргскла з шорсткістю поверхні не більше  $Rz = 1,0$ . Загальна довжина каналу 970 мм.

Діаметр всіх циліндрів  $D$  складає 22 мм, довжина кожної трубки – 220 мм, а робоча довжина, в межах поперечного перерізу каналу,  $l = 105$ . Відносний поперечний крок розташування циліндрів у однорядному пучку складає  $s_1/D = 1,7$ . На зовнішній поверхні труби виконана однозахідна гвинтова канавка прямокутної форми – її глибина – 1,8 мм, а ширина – 3,0 мм.

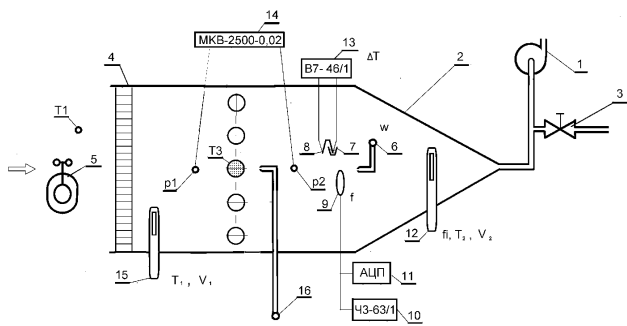


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – вентилятор; 2 – конічна частина робочої ділянки; 3 – регулюючий клапан; 4 – хонейкомб; 5 – вхідний анемометр; 6 – рухома трубка Піто (повздовжня координата); 7 – волога термopapa; 8 – суха термopapa; 9 – п'єзокерамічний датчик; 10 – частотомір; 11 – аналого-цифровий перетворювач; 12 – вимірювач відносної вологості, температури, швидкості; 13 – цифровий вольтметр; 14 – мікроманометр; 15 – вимірювач швидкості повітря і температури; 16 – рухома трубка Піто (поперечна координата); T1 – ртутний термометр; T3 – льодовий калориметр; p1, p2 – заміри статичного тиску для визначення гідравлічного опору.

### 1.1. Методика проведення дослідів

Середній по поверхні труби коефіцієнт тепловіддачі визначався методом танення льоду. Вимірювання проводились на центральному циліндрі (заштрихований на рис.1). Кінці циліндрів були ретельно теплоізовані, і розміщувались в непроточних повітряних камерах. До експерименту досліджуваний циліндр заповнювався дистильованою водою і поміщався в морозильну камеру для утворення льоду. Після включення вентилятора і системи вимірювань витримувався певний проміжок часу для виходу установки на постійний режим, коли показання всіх термодатчиків на протязі 10 хвилин відрізнялись на величину не більше  $\pm 0,5\%$ . Потім на місце одного з циліндрів встановлювався циліндр-калориметр і певний час витримувався в потоці повітря. Після певного проміжку часу циліндр-калориметр виймався для вимірювання кількості води, що утворилась. Об'єми льоду, що розтанув і що залишився, визначались за допомогою мірної ємності з ціною поділки 0,1 мл. Кількість води, яка сконденсувалась із повітря на зовнішній поверхні циліндра-калориметра, визначалась зважуванням промокливого паперу. Для перевірки масового балансу вимірювалась також кількість льоду, що залишився в циліндрі.

## 2. Методика визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі

Основні особливості методики обробки експериментальних даних розглянуті в [2]. Кількість теплоти, яка підводиться до бокової поверхні циліндра-калориметра для утворення певного об'єму води, визначається за допомогою рівняння теплового балансу

Узагальнення експериментальних даних виконано у формі рівняння подібності:

$$Q = rV\rho_b + c_M(t_f - t_{fH})F_S\delta\rho_M + c_L(t_f - t_{fH})V\rho_L \quad (1)$$

Доданки у правій частині рівняння визначають, відповідно, теплоту, витрачену на плавлення льоду, підведену до стінки калориметра, і витрачену на нагрів льоду до температури плавлення.

Середня товщина шару води, що утворилась за час експерименту, складає величину:

$$S = \frac{D_i}{2} - \sqrt{\frac{D_i^2}{4} - \frac{V}{\pi \cdot L}} \quad (2)$$

де,  $V$  – об'єм води, що утворився,  $L$  – довжина калориметра. Вираз для середнього по поверхні теплового потоку через стінку калориметра з урахуванням конденсації вологи повітря має вигляд:

$$\frac{Q}{\tau} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{\alpha}} + \frac{S}{2 \cdot \lambda} + \frac{\delta}{\lambda_M}} \cdot F \cdot (t_i - t_f) \quad (3)$$

Середній коефіцієнт теплопередачі від повітря до льоду у калориметрі визначається з наступного виразу:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\frac{F(t_i - t_f) \cdot \tau}{Q} - \frac{S}{2\lambda} - \frac{\delta}{\lambda_M}} \quad (4)$$

Середній коефіцієнт теплопередачі від повітря до льоду у калориметрі з урахуванням ефекту конденсації [3] на зовнішній поверхні визначається з наступного виразу:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\frac{F(t_i - t_f) \cdot \tau}{Q - Q_w} - \frac{S}{2\lambda} - \frac{\delta}{\lambda_M}} \quad (5)$$

де

$$Q_w = 1,01(T_1 - T_2) + 2493(x_1 - x_2) + 1,97(x_1 T_1 - x_2 T_2) \quad (6)$$

$$x_i = 0,622 \frac{f_{i_i} \cdot p_{ni}}{p_{BAR} \cdot f_{i_i} \cdot p_{ni}} \quad (7)$$

## 2.1. Результати дослідження

На рис. 2 наведено результати тарувальних експериментів в формі відносної розбіжності між середньою тепловіддачею в випадках сухого і вологого повітря, що обтікає циліндр-калориметр. Розрахунки виконані з використання формул (5) - (7). Кількість вологи на поверхні циліндра визначалося зважуванням промокливого паперу і контролювалось за методикою роботи [3]. Дослідження проводилися при температурі повітря  $t = 20^{\circ}\text{C}$ . Отримані результати показують, що при використанні методу танення льоду вологість повітря істотно впливає на результати визначення середнього коефіцієнту тепловіддачі. При вологості повітря менше 53% відносна похибка

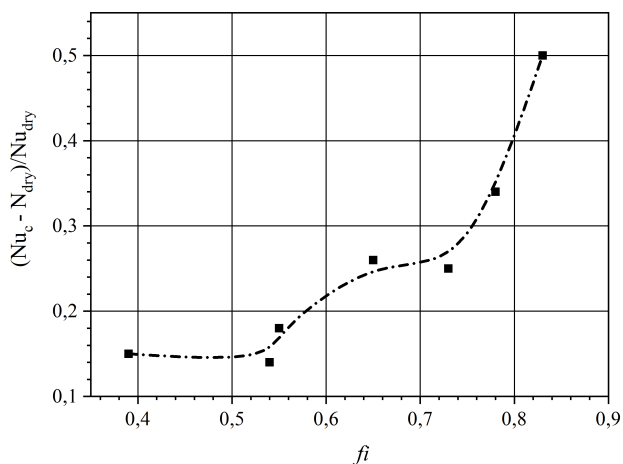


Рис. 2. Відносна похибка визначення числа Нуссельта при поперечному обтіканні циліндра-калориметра сухим і вологим повітрям, при температурі повітря  $t = 20^\circ\text{C}$

визначення числа Нуссельта становить близько 15%, але потім вона швидко зростає до 40% при вологості повітря 80%.

## Висновки

1. Уточнено методику визначення середнього коефіцієнту тепловіддачі методом танення льоду при поперечному обтіканні круглого циліндра.

2. Показано, що неврахування вологості повітря, що обтікає циліндр-калориметр, може привести до великої похибки при визначенні середнього коефіцієнту тепловіддачі, особливо при вологості повітря більше 53%.

## Перелік використаних джерел

1. Шлихтигин Г. Теория пограничного слоя. — Москва: Наука, 1969.- 744 с.
2. Коваленко Г. В., Халатов А. А. Применение ледяных калориметров для исследования теплоотдачи поверхностей, формированных углублениями // Промышленная теплотехника. — 2008. — № 2. — С. 5–12.
3. Таубман Е. И., Гориев В. А., Мельцер В. Л., Пастушенко Б. Л., Савинкин В. И. Контактные теплообменники. — М., Химия, 1987. 256 с.